

粘性土剪切带与屈服应力的探讨

李苏春^{1,2}, 蒋 刚¹, 雷秋生²

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省纺织工业设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215001)

摘要: 利用全自动三轴仪,对南京地区典型的粉土、粉质粘土试样进行了固结不排水剪试验,研究具有剪切带性状试样的孔隙水压力随偏应力的变化关系,分析屈服应力、孔隙水压力和土体分叉之间的关系. 试验结果表明,孔隙水压力的峰值可以表征土体局部开始屈服,并出现应变局部化的状态. 围压的增大会延迟土体分叉,而干密度较大时易出现剪切带. 可用土体初始分叉点来确定土体的强度参数.

关 键 词: 剪切带; 屈服; 分叉; 孔隙水压力

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)02-0089-05

An exploration of shear band of cohesive soils and yield stress

LI Su-chun^{1,2}, JIANG Gang¹, LEI Qiu-sheng²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Suzhou Branch, Jiangsu Province Textile Industry Design and Research Co., Ltd., Suzhou 215001, China)

Abstract: The undrained shear tests of Nanjing silty and silty clay were conducted by the KTG to investigate relationships between pore water pressure and deviator of specimens with shear band, and to analyze yield stress and pore water pressure and soil bifurcation. The experimental analysis shows that water pressure peak can illuminate the state when some districts in soil begin to yield and deformation localization occurs. The soil bifurcation will be delayed as the confining pressure increases. But shear band is apt to come in the specimen with high dry density. The strength parameters can be determined by onset of soil bifurcation.

Key words: shear band; yield stress; bifurcation; pore water pressure

与其它工程材料一样,土具有应力-应变特性和屈服特性. 当土体某一微小区域满足屈服条件时,便开始产生塑性应变^[1-3]. 随着应力的增加,薄层区域内的变形相对较大,而区域外的变形相对较小,随之土体出现分叉,沿着一定倾角的条带状出现剪切带破坏^[4,5]. 因此,土体的屈服和剪切带的分叉有着一定的联系. 本文在不排水条件下对重塑粉土和原状粉质粘土进行了三轴不排水剪试验,得到了具有剪切带性状的应力-应变-孔压之间的关系曲线,探讨屈服、孔隙水压力和土体分叉三者之间的关系.

收稿日期: 2007-07-30

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目(01KJB410001)

作者简介: 李苏春(1981-),男,江苏徐州人,助理工程师,硕士,主要从事土体基本性质研究. E-mail: celsch@163.com.

1 屈服点的判别

E. W. Brand 等^[6]指出:不排水试验中产生的超孔隙水压力受土的体积应变特性的影响,可以用孔隙水压力的急剧增长变化来表明一种屈服条件.图 1 给出了微超固结的高岭土室内制备土样的不排水三轴压缩试验结果.其中,试样 A 为轴向应变为零条件下进行的非等向固结试验,随后土样在侧向应变为零的条件下膨胀,直至 $OCR=1.25$;试样 B 为等向固结后使土样等向膨胀直到 $OCR=1.3$. 试样 A 和 B 的孔隙水压力与偏应力 $q-q_0$ 变化的关系曲线(见图 1)表明,对于土样 A,在 $q-q_0=160$ kPa 时,孔隙水压力突然增长,可以认为已达到屈服条件;土样 B 的孔隙水压力却随 $q-q_0$ 的增加而显著提高,尤其是在 $q-q_0$ 超过 85 kPa 时,可认为是屈服点. 图中虚线表示各向同性弹性材料理论的特性曲线. 可见,对于 A 和 B 这两种试样,初期的反应与弹性体十分接近,并且可将孔隙水压力开始急剧增长的转折点看作其屈服点.

董建国等^[7]通过粘性土的固结不排水平面应变压缩试验得到,土体的屈服应力非常接近于剪切带开始时的偏应力,对应的竖向应变为 1.1%~2.3%. 说明在不排水条件下,当土体某区域开始屈服时,土体开始发生局部变形,变形集中在土体薄弱部位,继而出现剪切带.

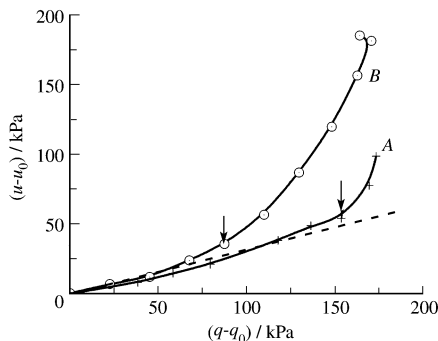


图 1 可能出现屈服点的高岭土的孔隙水压力变化^[2]
Fig. 1 Pore water pressure response indicating occurring possibly in undrained tests on Kaolin^[2]

2 试样简介

选取了南京地区典型的土体试样进行固结三轴不排水剪试验,分别为马台街扰动粉土(MM)和仙林社区原状粉质粘土(XC),其中,马台街扰动粉土(MM)为灰色、软塑、饱和,局部夹粉砂;仙林社区原状粉质粘土(XC)为灰黄色~黄褐色、硬塑、饱和,含少量铁锰结核,较均匀. 扰动样采用烘干碾散重塑制样,原状样采用薄壁取土器取出制样,试样直径 39.1 mm,高 80 mm. 取土深度及物理力学性质指标见表 1.

表 1 土样物理指标
Tab. 1 Physical property of soil samples

土 名	取土深度 <i>h</i> / m	含水量 <i>w</i> / %	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比 <i>e</i>	液 限 w_L / %	塑 限 w_P / %	塑性指数 I_P
MM	10.0	35.1	18.3	0.980	29.0 *	19.2 *	9.8
XC	5.0	24.6	19.5	0.748	33.5	18.9	14.6

注:“*”表示该项目在液塑限联合仪下进行.

3 试验结果及分析

3.1 孔压与偏应力关系曲线

3 种不同干密度的重塑粉土(MM)试样的孔隙水压力和偏应变的关系曲线见图 2,孔压峰值时的应变、偏应力和孔压值见表 2. 从图 2 可见,开始剪切时重塑粉土样体积压缩,孔隙水受到挤压,孔隙水压力迅速增加,随着剪切的进行,孔压出现峰值,然后开始迅速下降,直到偏应力出现峰值时,孔压基本不变. 在整个试验过程中,土样表现出从剪缩到剪胀的变化. 在围压 $\sigma_3=25$ kPa 时,孔压峰值时的应变较小,约为 2%. 随着围压的增加,孔压峰值延迟出现,而干密度的增加会加速孔压峰值的出现.

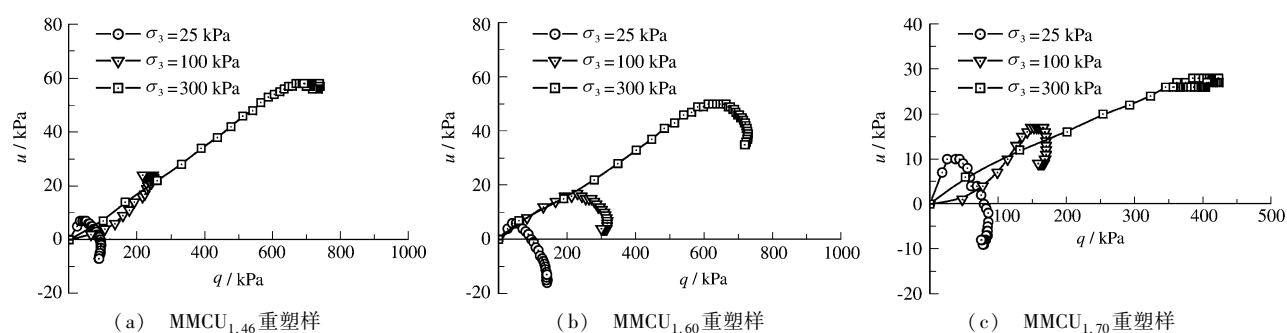


图2 重塑粉土的孔压-偏应力曲线

Fig. 2 Water pressure-deviator curve of remolded silt

表2 孔压峰值时的应变、偏应力和孔压

Tab. 2 Strain, deviator and water pressure of water pressure peak

试验编号	围压 σ_3 / kPa	ε_1 / %	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ / kPa	u / kPa
MMCU _{1.46}	25	2	50	7
	100	6	249	23
	300	6.8	669	58
MMCU _{1.60}	25	1.6	60	6
	100	2.4	230	17
	300	5.2	612	50
MMCU _{1.70}	25	1.6	87	10
	100	3.2	296	17
	300	4	770	28

注:MM 表示马台街粉土,下标为干密度.

不同含水量的原状粉质粘土(XC)试样的孔隙水压力和偏应变的关系曲线见图3,孔压峰值时的应变、偏应力和孔压见表3.从图3可见,低围压($\sigma_3 = 50$ kPa)时,原状粉质粘土体积呈膨胀趋势,孔隙水压力为负值,表现出剪胀特性;高围压($\sigma_3 = 100$ 、200 kPa)时,体积呈压缩趋势,孔隙水压力迅速增加.随着剪切的进行,孔压增加,并出现峰值,然后迅速降低,等偏应力出现峰值时,孔压开始缓慢变化.低围压时,孔压峰值时的应变约为2%,围压的升高会推迟孔压峰值的出现.

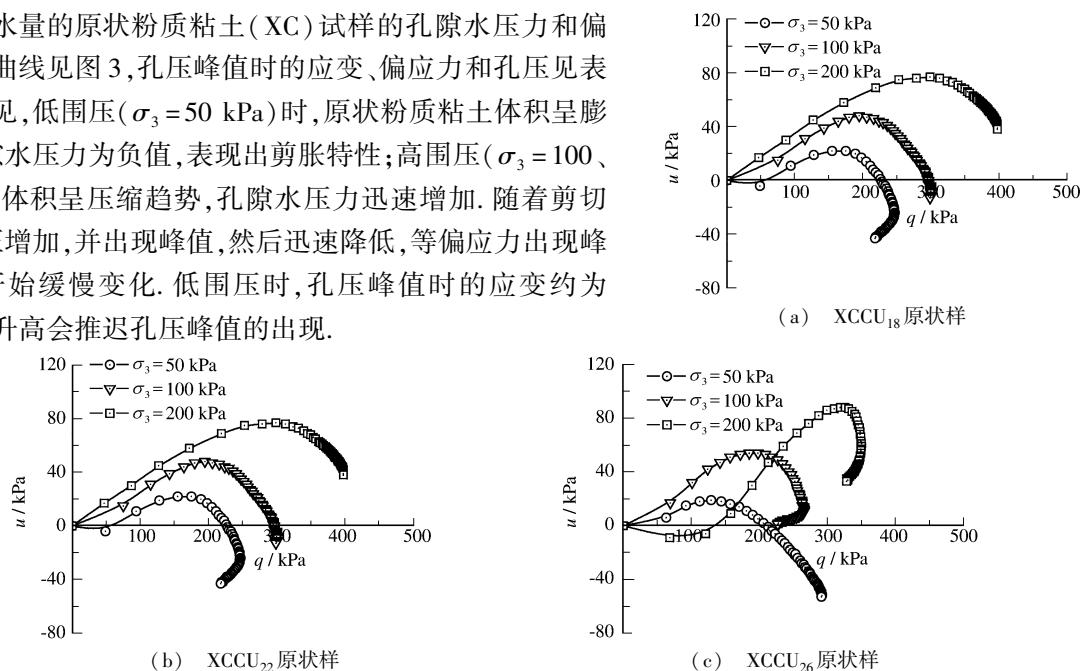


图3 原状粉质粘土样的孔压-偏应力曲线

Fig. 3 Water pressure-deviator curve of undisturbed silty clay

表 3 孔压峰值时的应变、偏应力和孔压

Tab. 3 Strain, deviator and water pressure of water pressure peak

试验编号	围压 σ_3 / kPa	ε_1 / %	$(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ / kPa	u / kPa
XCCU ₁₈	50	1.6	155	22
	100	2.4	195	48
	200	3.2	299	77
XCCU ₂₂	50	2.4	212	5
	100	1.6	204	35
	200	5.2	388	56
XCCU ₂₆	50	1.6	129	19
	100	2.8	185	54
	200	4.8	319	88

注:XC 表示仙林社区原状粉质粘土,下标为含水量。

3.2 强度参数比较

如果把孔压的急剧变化作为一种屈服条件,其应变值很小,非常接近于剪切带分叉的初始点,那么可以用孔隙水压力峰值来表征土体分叉的初始点,进而描述土体破坏的变形特性.在不排水剪切过程中,试样的偏应力—应变曲线、有效主应力比—应变曲线、孔隙水压力—应变曲线均出现峰值,将这 3 组峰值点对应的偏应力值作莫尔圆,求取相应的强度参数.重塑粉土样和原状粉质粘土样的 3 种峰值状态参数粘聚力 c 、内摩擦角 φ 以及有效粘聚力 c' 、有效内摩擦角 φ' 见表 4.

表 4 不同峰值状态下的强度参数

Tab. 4 Strength parameters in different peak values

强度参数	试验编号	MMCU _{1.46}	MMCU _{1.60}	MMCU _{1.70}	MMCU _{1.46}	MMCU _{1.60}	MMCU _{1.70}
粘聚力 c	A	9.8	23.7	30.7	70.0	101.3	99.9
	B	3.6	19.2	19.6	39.6	32.5	39.5
	C	2.2	5.5	9.6	36.6	36.3	38.1
内摩擦角 φ	A	31.4	33.1	31.8	19.5	17.9	11.5
	B	33.1	31.0	29.9	22.0	26.9	21.0
	C	31.8	34.1	33.5	19.1	23.7	19.8
有效粘聚力 c'	A	5.9	15.8	25.0	33.9	25.4	38.7
	B	3.5	13.8	21.5	36.7	18.29	27.9
	C	4.4	6.1	15.8	36.2	28.9	18.9
有效摩擦角 φ'	A	36.6	32.3	35.4	28.3	37.7	26.6
	B	36.8	34.2	35.6	28.0	33.8	30.0
	C	35.2	32.8	34.6	25.4	29.9	32.1

注:①MM 表示马台街重塑粉土样,下标为干密度;②XC 表示仙林社区原状粉质粘土,下标为含水量;③A 为偏应力峰值状态,B 为有效主应力比峰值状态,C 为孔压峰值状态。

可见,重塑粉土样 3 种峰值状态所确定的强度参数不相等.有效主应力比峰值时的粘聚力 c 是偏应力峰值时粘聚力 c 的 61%,孔隙水压力峰值时的粘聚力 c 为偏应力峰值时的 25%;相应的有效粘聚力 c' 分别为 77% 和 60%;有效主应力比峰值时的内摩擦角 φ 是偏应力峰值的内摩擦角 φ 的 1.03 倍,而孔隙水压力峰值时的内摩擦角 φ 与偏应力峰值的相等;相应的有效内摩擦角 φ' 分别为 102% 和 98%.因此,剪切带的出现,对粉土土体的粘聚力的影响较大,对内摩擦角的影响较小.

而对于原状粉质粘土,应变很大时才出现偏应力峰值,有的甚至没有峰值.因此,将有效主应力比峰值与孔隙水压力峰值时的参数进行对比.孔隙水压力峰值的粘聚力 c 与有效主应力比峰值时粘聚力相等,相应的有效粘聚力 c' 为 1.08 倍;孔隙水压力峰值的内摩擦角 φ 为有效主应力比峰值的内摩擦角 φ 的 90%,相应的有效内摩擦角 φ' 为 95%.可见,剪切带的出现,对粉质粘土土体的强度参数影响不大.

因此,剪切带的出现对土体的强度有影响.实际工程(如基坑工程)中,不应忽视局部变形的影响,可采

用剪切带开始形成时的偏应力来确定土体的强度参数,特别是含有粉土的土层,粘聚力的选取要特别慎重.

3.3 剪切带的破坏形态

大部分常规三轴压缩试验中,土样破坏时呈现明显的塑性破坏迹象,同时又能观察到剪切带形态的应变局部化.在剪切过程中,圆柱状的三轴试样一旦被一条剪切面劈裂成两块,就形成了典型的剪切带(见图4(a)).在常规三轴固结不排水试验中,土样剪切带类型表现为单一剪切破坏、“X”交叉剪切破坏、单一局部剪切破坏和两条平行剪切破坏4种剪切形态(见图4).其中,粉土样多为单一破坏形态,而粉质粘土样多为局部单一剪切带的破坏类型.

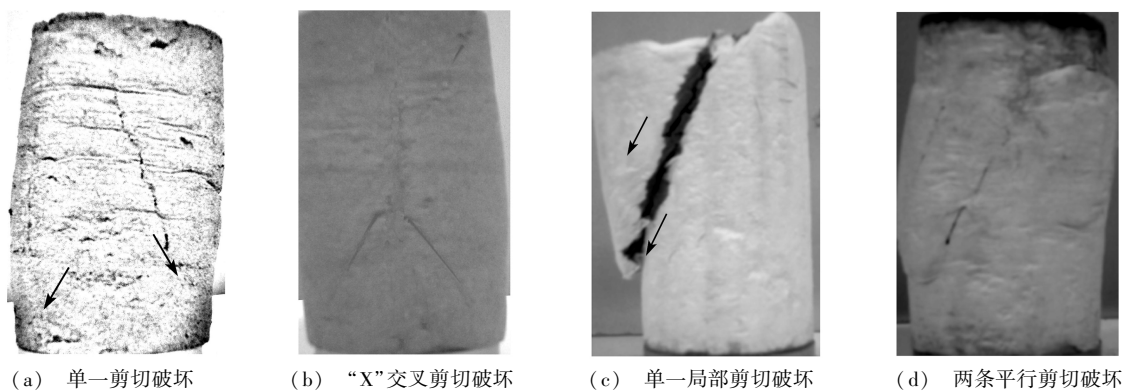


图4 带有剪切带的三轴试样

Fig.4 Triaxial specimen with shear band

4 结 语

具有剪切带状的土体试样,其屈服应力、孔隙水压力和土体分叉有着密切的关系.本文试验结果表明:

(1) 孔隙水压力峰值可以表征土体局部开始屈服,并出现局部变形.具有剪切带的土体,较多地表现出超固结土的特性;

(2) 在不排水剪切过程中,孔隙水压力随偏应力的增加表现出先增后减,先正后负的剪胀特性;

(3) 围压的增加会延迟土体分叉,干密度的增加使土体提早出现剪切带;

(4) 剪切带的出现,对土体的强度参数粘聚力 c 和内摩擦角 φ 都有影响.实际工程中,不应忽视局部变形的影响,可采用剪切带开始形成时对应的偏应力来确定土体的强度参数;

(5) 在固结不排水剪试验中,土样剪切带类型表现为单一剪切破坏、“X”交叉剪切破坏、单一局部剪切破坏和两条平行剪切破坏4种剪切形态.其中,粉土样多为单一破坏形态,而粉质粘土样多为局部单一剪切破坏类型.

参 考 文 献:

- [1] 高红,郑颖人,冯夏庭.材料屈服与破坏的探索[J].岩石力学与工程学报.2006,25(12):2515-2522.
- [2] 李国琛.剪切带状分叉力学条件[J].力学学报,1988,20(4):305-312.
- [3] 沈珠江.土体渐进性破坏问题研究的进展[J].河海大学学报,1999,27:1-4.
- [4] 蒋明镜,沈珠江.结构性粘土剪切带的微观分析[J].岩土工程学报,1998,20(2):102-108.
- [5] Desrues J, Chambon R. Shear band analysis and shear moduli calibration[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2002, 39(13): 3757-3776.
- [6] Brand, E W., Brenner, R P. Soft clay engineering[M]. 叶书麟,宰金璋,等译.北京:中国铁道出版社,1991:163-168.
- [7] 董建国,袁聚云.基坑设计考虑粘性土变形局部化的探讨[J].岩土工程学报.2006,28(增):1383-1386.